

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01920

研究課題名（和文）暗黒物質探索検出器を用いた二重ベータ崩壊探索の研究

研究課題名（英文）The search for double beta decay with a dark matter detector

研究代表者

山下 雅樹 (Yamashita, Masaki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：10504574

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：Xe-136はニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の候補核である。濃縮されていないXeを用いて暗黒物質直接探索二相型キセノンTPC検出器の低バックグラウンド、高エネルギー分解能の特性を生かし、二重ベータ崩壊探索・感度の見積もりを行った。XENON1Tデータ：36.16 kg・年のデータを用いて0探索を行い90%CLで半減期 1.2×10^{-24} 年の下限値を得た。稼働中XENONnT検出器の感度を見積もった。275kg・年の観測データを仮定すると、予想される感度は90%CLで半減期 $> 2.1 \times 10^{-25}$ 年の結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では暗黒物質直接探索実験装置を用いて二重ベータ崩壊探索を行った。検出器の大型化に伴い、8.9%自然に存在するXe-136の量もおよそトンスケールに増え、暗黒物質探索だけでなく、二重ベータ崩壊探索が可能である。

本研究の結果はカムランド禅やEXO200など二重ベータ崩壊に特化した実験には及ばないものの暗黒物質検出器としては最も良い感度で探索を行うことができ、将来さらに大型化される検出器ではそれらに匹敵するほど大きく感度を上げることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Xe-136 is a candidate nucleus for neutrino-less double beta decay. Direct dark matter search detectors using unenriched Xe, taking advantage of the low background and high energy resolution characteristics of the two-phase xenon TPC detector, was used in this study. A 0 search was performed using XENON1T data: 36.16 kg/yr, and a lower limit of half-life 1.2×10^{-24} yr was obtained at 90% CL. A lower limit of 1.2×10^{-24} years was obtained at 90% CL. The sensitivity of the working XENONnT detector was estimated: assuming 275 kg/yr of data, the expected sensitivity was 90% CL with a half-life $> 2.1 \times 10^{-25}$ years.

研究分野：宇宙素粒子実験

キーワード：二重ベータ崩壊 ニュートリノ 液体キセノン検出器 極低放射能

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

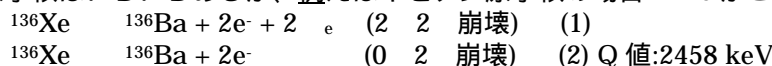
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(0 2)探索実験はニュートリノ質量観測が期待され、素粒子・原子核物理だけでなく宇宙物理の観点からも注目を浴びている。

一方、地下実験における暗黒物質(以下 DM)直接探索の技術進展は近年目覚ましいものがあり、検出器の大型化、低バックグラウンド化を着実に実現してきた。そこで、本研究では大型 DM 探索検出器(XENON1T、XENONnT)を用いて 0 2 の探索を行い、さらにその技術を次世代実験につなげることを目的とする。DM 探索と 0 2 探索の大きな違いはそのエネルギー領域にあり(10keV 以下 vs 2458 keV)、その信号の大きさに伴う解析方法やバックグラウンドも自ずと異なる。そして、どの DM 検出器においても未だ 0 2 探索が行われていない。

2. 研究の目的

ニュートリノは 1930 年代に提唱、1950 年代にその存在が確認され、現在でもニュートリノ振動実験や天文観測など盛んに研究が行われている。スーパーカミオカンデ・大気ニュートリノによる観測からニュートリノ質量の存在は証明されているが、まだその質量は分かっていない。それ故、ニュートリノの質量を得ることは、素粒子物理学にとって重要な課題となっている。

ニュートリノの質量を探索する実験として二重ベータ崩壊が注目されている。これは原子核中の 2 つの中性子が陽子に変換する崩壊を同時に起こす現象である。この二重ベータ崩壊を起こす原子核はいろいろあるが、例えばキセノン原子核の場合 ^{136}Xe がこれにあたる。



式(1)が示すようなニュートリノを伴う崩壊は標準理論でも許され、既に観測されている。しかし、ニュートリノが粒子・反粒子で同一の粒子(マヨラナ粒子)である場合、式(2)のようにニュートリノを伴わない崩壊が許され粒子数保存則(レプトン数)の保存則を破る。更に、式(2)の崩壊率はニュートリノ質量の絶対値を与える。また、0 2 崩壊が観測されること、つまり、粒子数保存則の破れは、もう一つの大きな問い「なぜ、この宇宙には物質が残り、反物質が消えたのか？」に対して鍵を握る。CP 対称性の破れと合わせ、福来、柳田によって示されたレプトジェネシスは、物質粒子優勢の宇宙が出来上がったことを説明できる有力なシナリオである。このように学術的「問い」、すなわち「ニュートリノはマヨラナ粒子か?」「宇宙初期の物質粒子生成の謎」といった宇宙・素粒子の大問題を解決するため、唯一現実的と考えられている「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(0ν2β)」の探索を世界トップクラスに匹敵する半減期感度を目指す。これは、ニュートリノ有効質量にして 0.08-0.22 eV に相当する。

この探索には既に実験を終了した XENON1T、2020 年より運転が開始される XENONnT を用いる。その理由は、DM 検出器は近年ターゲット質量が 1 トンから 10 トンに及ぶ大型検出器が運転開始し、また今後 50-100 トンの標的を用いる計画がされている背景がある。特に液体キセノンを用いた検出器は大質量化が容易で、バックグラウンドとなる放射性物質が少なく、世界で最も感度の良い探索がキセノンを用いてカムランド禅実験、EXO-200 実験で行われている。さらに、キセノンには 0 2 候補である ^{136}Xe 自然同位体が 8.8%含まれており、大型化され、極低放射性バックグラウンドを満たす暗黒物質検出器は 0 2 の信号探索に最適な条件が揃っている。また、付随する探索としてキセノン原子核による ^{124}Xe の二重電子捕獲は XENON1T 実験で初めて観測されこの解析もアップデートが行われた。

3. 研究の方法

1)XENON1T [1] TPC は、高さ 97cm、直径 96cm の液体キセノン有し、実験は既に終了している。TPC の有効体積の上下に、それぞれ 127 個と 121 個の浜松 R11410-21 3 インチ PMT の 2 つのアレイが配置され、標的体積は、検出器の総量 3.2 トンのうち、2 トンの液体キセノンを用いた。TPC の側壁には、集光効率を高めるためにポリテトラフルオロエチレン(PTFE)製の反射板が使用されており、TPC の底部に設置されたカソード電極と、液体と気体の間から 2.5mm 下のゲート電極という 2 つの電極により、81V/cm のドリフト電場をかけている。また、液体-ガス界面から 2.5mm 上方に設置した陽極は、8.1kV/cm の電場を作る。この領域で電離電子を加速することで比例傾向を起こす(S2)。液体キセノンを保持するクライオスタット

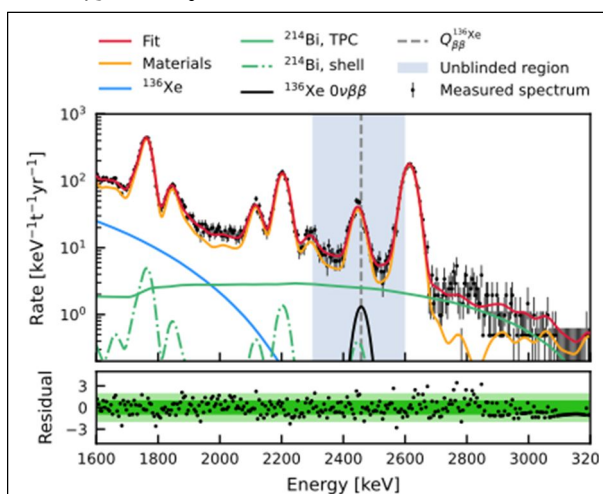


図1 XENON1T で得られたエネルギースペクトラム。バックグラウンドモデルと信号をフィットした結果。[3]

は、環境中のガンマ線と中性子を遮蔽するために、700 トンの超高純度水で満たされたステンレス製タンクの中心に設置されている。タンクには 84 個の PMT が設置され、チェレンコフ光を検出することでミュオンとミュオンによるバックグラウンドを能動的に veto する。今回、解析に使用されるデータは、2017 年 2 月から 2018 年 9 月にかけてのデータとなる。

2) XENONnT は、XENON1T の後継実験である。2020 年後半にコミッショニングされ、その後すぐに運用を開始した。XENON1T で既に開発された、いくつかのサブシステムを再利用し、ラドン除去用蒸留塔、液相純化装置、中性子反同時計数水チェレンコフ検出器を追加した。TPC は、直径 133cm、高さ 148cm の有効質量に 5.9 トンの液体キセノンを含む。クライオスタットには合計 8.5 トンの液体キセノンが利用される。上下の光センサーアレイには、それぞれ 253 個と 241 個の光電子増倍管が設置されている。MeV エネルギーでの大きな電離信号 (S2 と呼ばれる) によるデジタルタイザーの飽和を避けるため、上部アレイの PMT は、DM 探索に用いられる 10 倍の増幅率と並行して、0.5 倍の増幅率で読み出しが用意された。この 2 次読み出しは、0 探索のために特別に設置されたものである。事象の位置構成は深層学習を用いて行われ、それでもなお飽和する ADC のチャンネルは復元アルゴリズムが用いられている [2]。

図 1 に例として、XENON1T で得られた Science Run のエネルギースペクトラムを示す。0、2、およびバックグラウンドの fitting を行い解析を行なった。最も寄与の大きいバックグラウンドは光センサーやステンレス製クライオスタットなどの検出器部材 (Material) であることが分かる。

4. 研究成果

1) XENON1T においては、 ^{124}Xe の二重電子捕獲 (2 ECEC) と ^{136}Xe のニュートリノなし二重崩壊 (0 ν 2 β) の探索結果を報告した。二重電子捕獲において K 殻から N 殻までを 2 ECEC 信号モデルに含め、0.87 kg yr の同位体存在比 (^{124}Xe 0.094%) を考慮したデータ解析を行い、

$T_{0.95} = (1.1 \pm 0.2 \pm 0.1) \times 10^{22}$ 年の半減期の結果を得た。信号の統計的有意性は 7.0 である。(前回は 4.4s)

2) XENON1T のデータで 36.16 kg yr の ^{136}Xe を標的とし、0 ν 2 β を探索した。シグナルの証拠は見つからず、 $T_{0.95}$ の半減期の下限値を報告した。

$T_{0.95} > 1.2 \times 10^{24}$ 年 (90%CL) であり、この結果はカムランド禅や EXO200 など二重ベータ崩壊に特化した実験には及ばないものの暗黒物質検出器としては最も良い感度で探索を行ったことになる。(図 2)

3) XENONnT の 0 ν 2 β に対する感度の予測も報告する。 ^{136}Xe を 275 kg yr の観測を仮定すると、予想される感度は

$T_{0.95} > 2.1 \times 10^{25}$ yr (90%CL) であり (図 2)、1/2 有効マヨラナ質量範囲 $m < (0.19-0.59) \text{ eV}/c^2$ に相当する。現在 XENONnT データを解析中である。

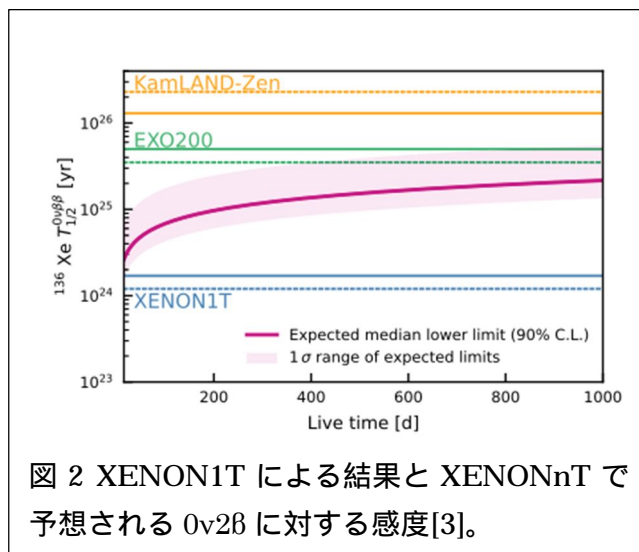


図 2 XENON1T による結果と XENONnT で予想される $0\nu 2\beta$ に対する感度 [3]。

<引用文献>

- [1] E. Aprile et al. (XENON Collaboration) Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment JCAP, 11(2020)031
- [2] E. Aprile et al. (XENON Collaboration) Energy resolution and linearity of XENON1T in the MeV energy range Eur. Phys. J., C, 80(2020)785
- [3] E. Aprile et al. (XENON Collaboration) Double-weak decays of ^{124}Xe and ^{136}Xe in the XENON1T and XENONnT experiments Physical Review C, 106(2020)024328

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aprile E. et al. (XENON Collaboration)	4. 巻 106
2. 論文標題 Double-weak decays of 124-Xe and 136-Xe in the XENON1T and XENONnT experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.106.024328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 XENON collaboration, E. Aprile et al.	4. 巻 80
2. 論文標題 Energy resolution and linearity of XENON1T in the MeV energy range	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-020-8284-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 XENON collaboration, E. Aprile et al.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 031 ~ 031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2020/11/031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 高感度大型装置で推進する暗黒物質直接探索
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」2021年領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 XENONnT実験：液体キセノン純化システムの成果
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 暗黒物質直接探索XENONnT実験による最新結果と展望
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会, 共催シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 XENON実験：二相型キセノンTPCを用いた暗黒物直接質探索実験とその状況報告
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会・秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 LXe Dark Matter activity at Nagoya
3. 学会等名 IBS and KMI Joint Workshop, online 2020/8/25 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 XENONnT実験: 暗黒物質探索検出器を用いた 二重ベータ崩壊の研究
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会 山形大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 XENONnT実験: 二相型キセノンTPC における二重ベータ崩壊の研究
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Masaki Yamashita' page https://member.ipmu.jp/masaki.yamashita/ XENONnT (IPMU) https://www.ipmu.jp/ja/research-activities/research-program/XENONnT</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安部 航 (Abe Ko)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	竹田 敦 (Takeda Atsushi)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	グランサッソ国立研究所	ポロニア大学	トリノ大学	他2機関
米国	コロンビア大学	シカゴ大学	サンディエゴ大学	他1機関
イスラエル	ワイズマン研究所			
ドイツ	マックスプランク研究所	マインツ大学	ミュンスター大学	他1機関
スイス	チューリッヒ大学			
中国	精華大学			